

文章编号 1004-924X(2003)06-05-05

基于 Fabry-Perot 结构的多通道滤光片的设计

王 利, 王占山, 吴永刚, 陈玲燕
(同济大学 光学精密工程技术研究所, 上海 200092)

摘要: 以法布里-珀罗结构为模型, 通过调整腔体间隔层的结构, 在理论上得到了具有多通道特性的滤光片。为了控制通道间的宽度及位置, 对不同折射率材料和不同腔体间隔层结构进行了模拟计算, 得出了基于 Fabry-Perot 结构的多通道滤光片的通道间隔可以通过选择不同的材料及改变腔体间隔层的结构来改变的结论。

关键词: 多通道滤光片; 法布里-珀罗结构; 反射相移; 截止带

中图分类号: TB43 文献标识码: A

Design of multiple channel filter based on Fabry-Perot structure

WANG Li, WANG Zhan shan, WU Yong gang, CHEN Ling yan

(*Department of Physics, Institute of Precision Optical Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Based on Fabry-Perot structure, a multiple channel filter is obtained in theory by changing the structure of spacer layers. In order to control the position and width of adjacent routeways, several materials with different refractive indexes and different cavity structures were studied. It is concluded that the width of adjacent routeways can be changed by changing the structure of spacer layers or adopting different materials.

Key words: multiple channel filter; Fabry-Perot structure; reflection phase; cutting band

1 引言

在大气监测和粮食检测等领域中, 由于所要探测的成分对于不同的波长有不同的吸收, 因而为提高探测灵敏度, 有时需要利用双波长或多波长^[1-2]。为了使探测器件向微型化和集成化方向发展^[3], 迫切需要研制具有在所需波长点有高的透过率, 而在其他波长处有宽截止带的滤光片, 即多通道滤光片。近年来, 多通道现象引起了人们的广泛重视, 如: 资剑等人^[4]利用光子能带理论探讨和描述了一维光子晶体的多通道现象。虽然

光子能带理论能很好地解释多通道现象, 但若能从薄膜光学的角度也能推出同样的结论, 将便于从事薄膜光学的研究者更好地理解多通道现象。这正是本文的主要工作。

2 理论基础

对一给定膜系, 由有效界面法选取多层膜中的某一膜层, 整个膜系可用两个有效界面表示, 只考虑选定膜层中的多次反射, 就可对整个膜系的特性进行分析。应用单层膜振幅透过系数计算方

收稿日期: 2003-03-04; 修订日期: 2003-09-11.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划课题(No. 2001CB610407)

法, 可得到选定膜层的合振幅透射系数为^[5]:

$$t = \frac{t_1^+ t_2^+ e^{-i\delta}}{1 - r_1^- r_2^+ e^{-2i\delta}}, \quad (1)$$

t_1^+ 、 t_2^+ 、 r_1^- 、 r_2^+ 分别为选定膜层两侧膜系的反射系数和透射系数, δ 为选定膜层的有效位相厚度。

如果选定膜层两侧媒质的导纳相同, 则透射率 T 为^[5]:

$$T = \frac{T_1 T_2}{(1 - R_1 R_2)^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4 R_1 R_2}{(1 - R_1 R_2)^2} \sin^2 \frac{1}{2} (\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta)}, \quad (2)$$

T_1 、 T_2 、 R_1 、 R_2 分别为选定膜层两侧的合振幅透射率和反射率, φ_1 、 φ_2 分别为两反射膜层的反射相移。

由式(2)可知, 若两反射膜层的 T_1 、 T_2 、 R_1 、 R_2 和反射相移 φ_1 、 φ_2 不变, 这时能改变的量是选定膜层的有效位相厚度 δ ($\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd$)。当

$$\varphi_1 + \varphi_2 - 2\delta = 2k\pi \quad (k = \pm 1, 2, 3), \quad (3)$$

时, 整个膜系的透射率 T 达最大值:

$$T_{\max} = \frac{T_1 T_2}{(1 - R_1 R_2)^2}, \quad (4)$$

如果两反射膜系为对称膜系, 且不考虑膜系的吸收等因素的影响, 两反射膜系的振幅反射率、振幅透射率分别相等, 即

$$R_1 = R_2 = 1 - T_1 = 1 - T_2$$

则整个膜系的透射率达到最大值 $T_{\max} = 1$ 。与该位相厚度 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} nd$ 相对应的波长 λ 处会有一个透过峰, 该峰即为滤光片的一个通道。如果想得到多通道滤光片, 需要每个通道的波长所对应的反射相移满足式(3)。

3 设计方法

假设给定的膜系结构为(HL)₅(H)_m(LH)₅, $H = n_h d_h = \lambda_0/4$, $L = n_l d_l = \lambda_0/4$, $\lambda_0 = 550$ nm, 基底折射率为 1.52, 入射介质为空气, H 为高折射率材料 ZnS, 其折射率取 2.3, L 为低折射率材料 MgF₂, 其折射率取 1.38。在以下讨论中均为正入射。

在 Fabry-Perot 结构中, 当两端的反射膜系给

定后, 对于确定波长, 在两反射膜层中的反射相移是两个定值。利用矩阵法求得这两个反射相移^[5]。对一给定膜系, 其特征矩阵为:

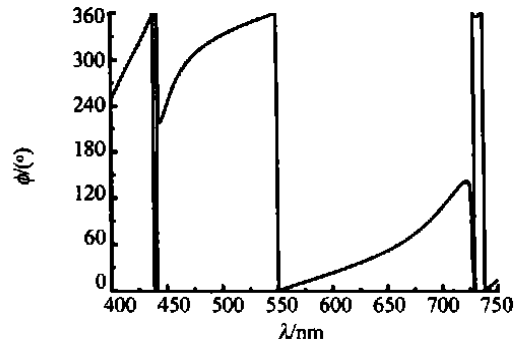
$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & iM_{12} \\ iM_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_g \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由此可得到多层膜的反射相移 φ

$$\tan \varphi = \frac{2n_0 n_g M_{12} M_{22} - 2n_0 M_{11} M_{21}}{n_0^2 M_{11}^2 - n_g^2 M_{22}^2 + n_0^2 n_g^2 M_{12}^2 - M_{21}^2}, \quad (6)$$

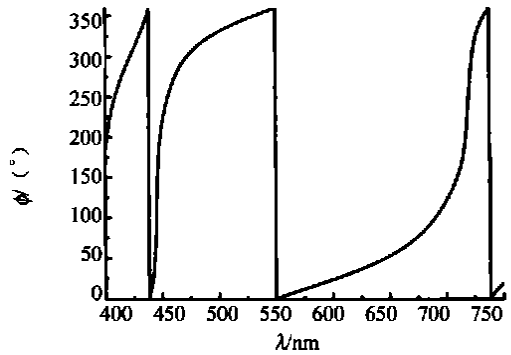
其中 n_0 、 n_g 分别为入射介质和基底的折射率。

图 1(a) 和图 1(b) 分别为计算得到的基底侧和入射介质侧的反射相移。



(a) 基底侧的反射相移

(a) Reflection phase of the substrate side



(b) 入射介质侧的反射相移

(b) Reflection phase of the incidence side

图 1 两反射层的反射相移

Fig. 1 Reflection phase of the two reflector layers

根据计算得到的反射相移 φ_1 、 φ_2 的值, 调整中间膜层的位相 δ 使通道位置波长对应位相满足式(3)。

单通道滤光片的设计: 假定峰值通道需要在 600 nm 处, 计算 600 nm 处两反射膜系的反射相移。经计算得, $\varphi_1 = 0.1307\pi$, $\varphi_2 = 0.1312\pi$ 。以光学厚度 H

为单位, 根据式(3)得:

$$2 \frac{2\pi}{\lambda} \alpha H = 2k\pi - \varphi_1 - \varphi_2$$

λ 等于 600 nm, 当 k 取零时, α 取值为 0.285。该膜系结构为 (HL)₅(H)_{0.285}(LH)₅, 峰值透射率 T_{max} 为 95.3%。其透射曲线如图 2 所示。

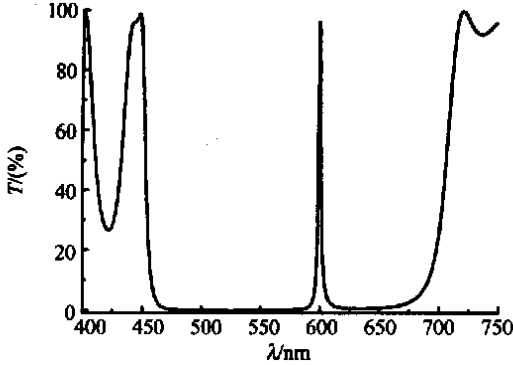


图 2 单通道滤光片的透射谱线, 峰值位置 $\lambda = 600$ nm

Fig.2 Transmission spectrum of single routeway filter, $\lambda = 600$ nm

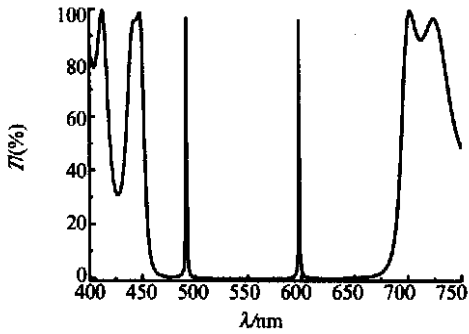


图 3 双通道滤光片的透射谱线, 峰值位置 $\lambda_1 = 492$ nm, $\lambda_2 = 598$ nm

Fig.3 Transmission spectrum of double routeways filter, $\lambda_1 = 492$ nm, $\lambda_2 = 598$ nm

双通道滤光片的设计: 对双通道滤光片, 也需要调整中间层的厚度, 使两个波长在该厚度值处对应的位相值 δ_1, δ_2 同时满足式(3)。假设需要在 492 nm、598 nm 处有两个通道, 经计算该膜系与 492 nm 对应的两反射膜系的反射相移分别为 $1.8028\pi, 1.8014\pi$, 与 598 nm 对应的两反射膜系的反射相移分别为 $0.1254\pi, 0.1259\pi$ 。根据式(3), 得:

$$\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 - 2\Delta\delta = 2k\pi (k = \pm 1, 2, 3), \quad (7)$$

$\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\delta$ 分别为式(3)中各物理量在 492 nm、598 nm 处所对应的差值。以光学厚度 H 为单位, 当中间层为 $6.8H$ 时式(5)成立。得到在

492 nm、598 nm 处两个透过率峰值, 峰值分别为 96.94%、96.16%。其膜层结构为 (HL)₅(H)_{6.8}(LH)₅, 透射率曲线如图 3 所示。

三通道滤光片的设计: 三通道滤光片的设计与双通道滤光片的设计方法相同。需要调整中间层的厚度, 使所要的三个通道对应的波长的位相厚度同时满足式(3)。设计了峰值在 487 nm、550 nm、632 nm 的三通道滤光片, 峰值透过率分别为 97.22%、95.74%、97.17%。其膜系结构为 (HL)₅(H)₁₂(LH)₅, 透射率曲线如图 4 所示。

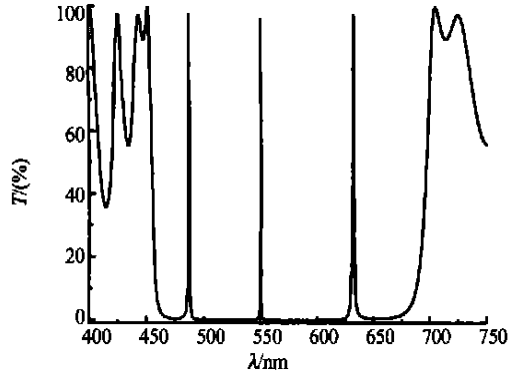


图 4 三通道滤光片的透射谱线($\lambda_1 = 487$ nm, $\lambda_2 = 550$ nm, $\lambda_3 = 632$ nm)

Fig.4 Transmission spectrum of three routeway filter, $\lambda_1 = 487$ nm, $\lambda_2 = 550$ nm, $\lambda_3 = 632$ nm)

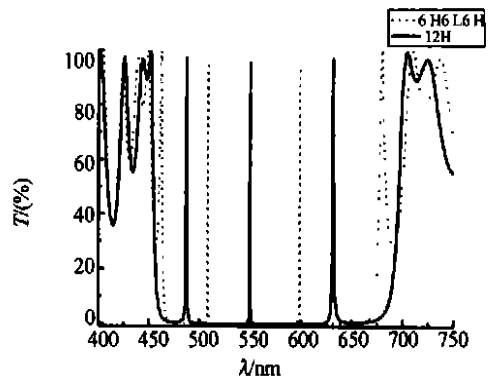


图 5 不同间隔层结构对通道间隔宽度的影响
Fig.5 Influence of the structure of spacer layers on the bandwidth of adjacent routeways

4 影响多通道滤光片通道间截止带宽度的因素

多通道滤光片在工作过程中要求低的背景透

过率、选择性地透过所需要的工作波长。在以上设计过程中得到的滤光片截止带不够宽,存在有大量的背景光透过。在不同的探测应用中,主次波长间隔是不同的。为了满足不同的探测应用,需要对以上设计进行优化,使其截止带展宽,并能调整通道间隔。由于影响多层膜性能的因素较多,特别是镀制工艺参数,很多人对此进行了研究^[6]。本文主要对不同的折射率材料及不同间隔层结构进行了模拟计算,寻找出在周期膜系中影响多通道滤光片通道间截止带宽度的理论因素。设讨论的结构为 $(HL)_5(H)_m(LH)_5$, $m = 12$, 设计波长 $\lambda = 550$ nm, 保持该结构不变, H 的折射率值不变, 只改变 L 的折射率值。经过计算, 通道间截止带宽度随 n_h/n_l 值的增大而增大; 在保持两边反射层不变的条件下, 通过改变间隔层的结构同样可以改变通道间截止带的宽度。计算了结构分别为 $(HL)_5(H)_{12}(LH)_5$, $(HL)_5(6H6L6H)(LH)_5$ 的透过率曲线, 如图 5 所示, 其中 $H = n_h d_h = \lambda_0/4$, $L = n_l d_l = \lambda_0/4$, $\lambda_0 = 550$ nm, $n_h = 2.3$, $n_l = 1.38$ 。因此, 为得到需要的通道间

隔, 在基于 Fabry-Perot 结构多通道滤光片的设计过程中, 可通过选择合适的高低折射率材料及改变中间间隔层的结构达到要求。

5 结 论

基于 Fabry-Perot 结构, 通过调整中间腔体间隔层的厚度, 给出了确定波长处的单通道、双通道、三通道滤光片的设计方法及影响通道间截止带宽度的因素。要想得到既具有需要的通道位置, 又具有理想截止带的多通道滤光片, 需要从膜层材料的选择、膜层结构的设计入手。为了得到满足要求的通道间隔, 在该结构中可通过选择不同的高低折射率材料及改变中间间隔层的结构进行设计。

对确定峰位的多于三个通道的滤光片, 简单地调整中间层的结构是不够的, 还要调整两反射膜系的膜层数目, 以满足透射率最大值的条件。由于在材料确定的条件下, 该结构通道两边的截止带宽度有限, 为得到通道两边更宽的截止带, 需要选择其他结构膜系, 该研究工作正在进行。

参考文献:

- [1] 是度芳, 洪伟. 差分吸收激光雷达及激光系统[J]. 华中理工大学学报, 1999, 27(6): 40-43.
SHI D F, HONG W. The differential absorption lidar with a cooperative object and its laser system[J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech.* 1999, 27(6): 40-43. (in Chinese)
- [2] 刘兴利, 王晓娜. 主次双波长光度法测定水体中的铁[J]. 化学研究与应用, 2002, 14(4): 421-422.
LIU X L, WANG X N. Determination of the iron in water using the method of primary secondary wavelengths[J]. *Chemical Research and Application*, 2002, 14(4): 421-422. (in Chinese)
- [3] 金南善. 用于线、面阵探测器上的多通道集成窄带滤光片的研制[J]. 光学 精密工程, 1993, 1(5): 27-35.
JIN N SH. The study and manufacture of variable filters used in linear detectors and area arrays detectors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1993, 1(5): 27-35. (in Chinese)
- [4] QIAO F, ZHANG CH, WAN J, et al. Photonic quantum well structures: Multiple channeled filtering phenomena[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(23): 3698-3700.
- [5] MACLEOD H A. *Thin film optical filters* [M]. Third Edition, Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001.
- [6] 王占山. 膜厚控制误差对软 X 射线多层膜性能影响的分析[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(2): 136-138.
WANG ZH SH. Effect of film thickness errors on performance of soft X ray multilayer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 136-138. (in Chinese)

作者简介: 王 利(1975-), 男, 山东泰安人, 聊城大学教师, 同济大学物理系硕士研究生, 主要研究方向为光学薄膜的设计和制备。E-mail: okwangliok@sohu.com